КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Криосфера Земли, 2023, т. XXVII, № 4, с. 45–53 **https://www.sibran.ru**

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОСФЕРЫ

УДК 550.837, 519.6, 551.34 DOI: 10.15372/KZ20230405

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОЛЕВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА МЕРЗЛЫХ ПОРОД

В.Н. Глинских, А.А. Федосеев*, М.Н. Никитенко, И.В. Михайлов, Д.А. Бухтияров

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

**Автор для контакта, FedoseevAA@ipgg.sbras.ru*

С целью обоснования технологии мониторинга многолетнемерзлых пород проведены теоретический анализ и моделирование полевых экспериментов высокоразрешающего геофизического метода импульсного электромагнитного зондирования. Для выбора оптимальных параметров зондирующей системы определена зависимость регистрируемой электродвижущей силы от расстояния между источником и приемником сигналов. На основе измерений температуры на геофизическом полигоне и выявленной зависимости между удельным электрическим сопротивлением и температурой рассчитаны вариации электросопротивлений приповерхностных супесей и суглинков за период с конца января по начало апреля 2022 г. Прослежена динамика изменения границы между сезонномерзлыми и нижележащими породами. С использованием рассчитанных по измеренной температуре электросопротивлений выполнено численное моделирование электродвижущей силы для установления зависимости сигналов от перемещения границы вследствие промерзания. Предложены подходы к верификации полученных результатов.

Ключевые слова: *мерзлые породы, электромагнитный мониторинг, межскважинное просвечивание, геоэлектрическая модель, импульсное электромагнитное зондирование, проектирование полевых экспериментов.*

Ссылка для цитирования: Глинских В.Н., Федосеев А.А., Никитенко М.Н., Михайлов И.В., Бухтияров Д.А. Проектирование полевых экспериментов для обоснования технологии мониторинга мерзлых пород // Криосфера Земли, 2023, т. XXVII, № 4, с. 45–53. DOI: 10.15372/KZ20230405.

DESIGN OF FIELD EXPERIMENTS FOR SUBSTANTIATION OF PERMAFROST MONITORING TECHNOLOGY

V.N. Glinskikh, A.A. Fedoseev*, M.N. Nikitenko, I.V. Mikhaylov, D.A. Bukhtiyarov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Koptyug Ave. 3, Novosibirsk, 630090 Russia

**Corresponding author, FedoseevAA@ipgg.sbras.ru*

The work is aimed at the theoretical development and modeling of field experiments for a high-resolution geophysical technique of transient electromagnetic sounding in order to substantiate a permafrost monitoring technology. To select the optimal parameters of the sounding system, we established the dynamics of changes in the registered electromotive force in terms of the distance between the signal transmitter and receiver. Based on field temperature measurements at the geophysical test site and the elucidated interrelation between the electrical resistivity and temperature values, we calculated the variations in the resistivity of the near-surface loams and clay loams for the period late January – early April 2022. The dynamics of changes in the boundary between seasonally frozen and underlying rocks was traced. Using the resistivity values calculated from the measured temperatures, we carried out numerical modeling of the electromotive force amplitude to identify the dependence of the signals on the shift of the boundary due to freezing. In addition, approaches were proposed to verification of the results obtained.

Keywords: *frozen rocks, electromagnetic monitoring, cross-borehole exploration, geoelectric model, transient electromagnetic sounding, design of field experiments.*

ВВЕДЕНИЕ

Общая площадь криолитозоны России составляет более 11 млн км^2 (две трети территории страны). При освоении северных и арктических территорий происходит интенсивное изменение экогеологических условий. Последствия техногенных воздействий на мерзлые породы чрезвычайно широки и включают просадки и провалы земной поверхности, заболачивание и подтопле-

© В.Н. Глинских, А.А. Федосеев, М.Н. Никитенко, И.В. Михайлов, Д.А. Бухтияров, 2023

ние территории, термокарстовые явления, пучение грунта, криогенное растрескивание и наледеобразование [*Павлов, 2008*]. Перечисленные явления крайне негативно воздействуют на основания зданий и сооружений, гражданских и промышленных объектов, на автодороги и магистрали, железнодорожные пути, взлетно-посадочные полосы, нефтегазопроводы, кустовые площадки нефтегазовых промыслов, линии электропередач. Все это приводит к постоянным ремонтным работам, вынужденному сносу объектов и в конечном счете многомиллиардным убыткам для государственного бюджета.

В России и за рубежом широкое применение получил температурный мониторинг криолитозоны [*Мельников и др., 1993; Vieira et al., 2010*], с установлением вкладов природных и техногенных процессов в температурный режим многолетнемерзлых пород [*Никитин и др., 2022*]. Следующими по распространенности методами геофизического мониторинга криолитозоны стали разновидности электрометрии: электротомография [*Сергеев, Белоусов, 2014; Квон и др., 2019; Hauck, 2002*], георадиолокация [*Ермаков, Старовойтов, 2010; Носкевич, Кузьбожев, 2016; Судакова и др., 2017*], включая вариант межскважинного просвечивания [*Черепанов, 2018*], и активно развиваемые в последнее время электромагнитные зондирования [*Шестернев и др., 2016; Копылов, Садуртдинов, 2020; Briggs et al., 2016*].

Рассматриваются подходы к комплексированию температурного и электрометрического мониторинга [*Onaca et al., 2015*], с изучением взаимосвязи температуры и удельного электрического сопротивления (УЭС) мерзлых пород [*Нерадовский, 2021*].

В то же время возможности импульсных электромагнитных зондирований для задач мониторинга криолитозоны [*Glinskikh et al., 2021*] проработаны в значительно меньшей степени, что подчеркивает необходимость развития данного перспективного направления. При импульсных электромагнитных зондированиях важно определение оптимальных параметров зондирующих систем. Полученные сигналы зондирования могут демонстрировать контрастную картину динамики изменения оттаивающего приповерхностного слоя.

Настоящая работа направлена на теоретическое развитие и моделирование полевых экспериментов высокоразрешающего геофизического метода импульсного электромагнитного зондирования с целью обоснования технологии мониторинга мерзлых пород. Прослежена динамика изменений сигналов электродвижущей силы (ЭДС) в зависимости от расстояния между источником и приемником, использована известная зависимость между значениями УЭС и температурой суглинков и супесей, а также выполнено моделирование с учетом практических измерений температуры. Показано, как на диаграммах ЭДС проявляются особенности, связанные с пространственными и временными вариациями мерзлых пород.

Численное моделирование сигналов импульсного зондирования для обоснования возможности мониторинга границы мерзлых пород

На базе специально созданного в Новосибирской области геофизического полигона проводились измерения прототипом установки импульсного межскважинного электромагнитного зондирования. Планировка полигона показана на рис. 1. Для измерений использовались антенны с источником и приемником, расположенные на дне шурфов и засыпанные сверху грунтом. Отметим, что максимумы диаграмм направленности ориентированы в одну сторону. Шурфы глубиной 1.5 м обрамлены деревянными досками толщиной не более 5 см, не влияющими на качество измерений. Приповерхностный слой геофизического полигона мощностью до 5 м сложен преимущественно супесями и суглинками. Рельеф полигона ровный и заснеженный, поскольку измерения проводились в зимний период. В зоне проведения измерений снег был полностью расчищен.

По результатам экспериментальных измерений импульсных сигналов, проходящих через геологическую среду, установлены зависимости амплитуды сигнала от вариации температуры ее верхнего слоя. Апробированы элементы технологии импульсного электромагнитного мониторинга в приповерхностной толще, отработана методика проведения измерений в холодное время года.

В статье представлены результаты численного моделирования сигналов для геоэлектрической модели полигона с учетом расположений источника и приемника, а также с использованием измеренной в разное время температуры породы. В дальнейшем полученные результаты послужат основой для практического обоснования технологии мониторинга многолетнемерзлых пород.

Для анализа возможности обнаружения нижней границы мерзлых пород рассмотрена модель промерзания пород сверху. Геоэлектрические параметры модели соответствуют характеристикам геофизического полигона, на котором производились измерения опытной установкой импульсного межскважинного электромагнитного зондирования. Верхнее полупространство – воздух с УЭС $\rho_1 = 10^6$ Ом·м. Нижележащий слой – сезонномерзлые породы с изменяющейся глубиной подошвы от 0 до 2 м, характеризующиеся высоким УЭС $\rho_2 = 1000$ Ом·м. Нижнее полупространство – непромерзшая толща с УЭС $\rho_3 = 10$ Ом·м. Система наблюдения представляет собой источник и приемник (катушки с током), расположенные в двух

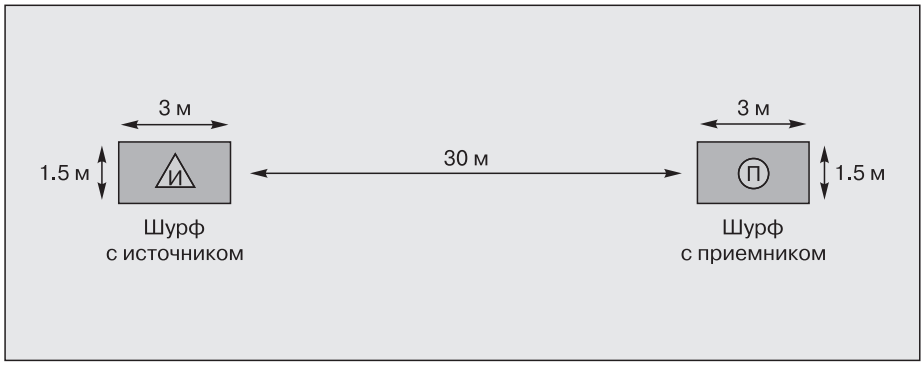

Рис. 1. План участка геофизического полигона для проведения полевых экспериментов импульсного электромагнитного зондирования.

шурфах (скважинах) глубиной 1.5 м на расстоянии друг от друга L = 10, 30, 100 м (рис. 2). Для удобства последующего численного моделирования вместо засыпанных грунтом шурфов задаются скважины, что упрощает расчеты, принципиально не меняя сути эксперимента и результатов. Момент двухкатушечного зонда с одним источником и приемником составляет 100 А·м^4. Для анализа основных особенностей поведения сигналов и их функций чувствительности используется прямоугольный импульс, в спектре которого содержится весь диапазон частот.

На рис. 3 представлены модули ЭДС в зависимости от времени и глубины до границы между мерзлыми и нижележащими породами (первым слоем и нижним полупространством) для компонент поля *ZZ*, *YY*, *XX*, *XZ* [*Никитенко и др., 2021*]. Положение границы изменяется от 0 до 2 м на каждом рисунке, таким образом на изображениях представлен мониторинг промерзающего слоя для каждой компоненты поля и для разных расстояний между скважинами.

По результатам численного моделирования сигналов импульсного электромагнитного зондирования [*Никитенко и др., 2023*] установлена динамика изменений сигналов ЭДС в зависимости от расстояния между источником и приемником. Так, при расстоянии между источником и приемником L = 10 м наблюдается самый сильный уровень сигнала (до 10^6 мкВ), для L = 30 м максимальная величина сигнала составляет 10^4 мкВ, а для L = 100 м равна $2{\cdot}10^2$ мкВ. Это указывает на то, что даже на таком большом расстоянии между шурфами с приборами измеряемый сигнал чувствителен к смещению границы между сезонномерзлыми и нижележащими породами. Тем не менее приоритетнее минимизировать расстояние между приемником и источником, поскольку сигналы будут более выраженными с более высокими значениями и широким динамическим диапазо-

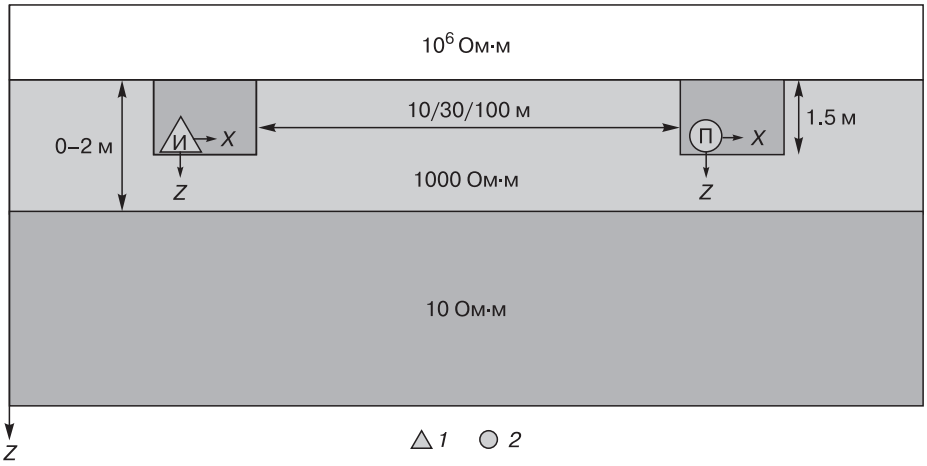

Рис. 2. Модель среды и расположение источника (*1*) и приемника (*2*) электромагнитного поля.

Верхний слой – воздух, средний – сезонномерзлые породы, нижний – непромерзшая толща.

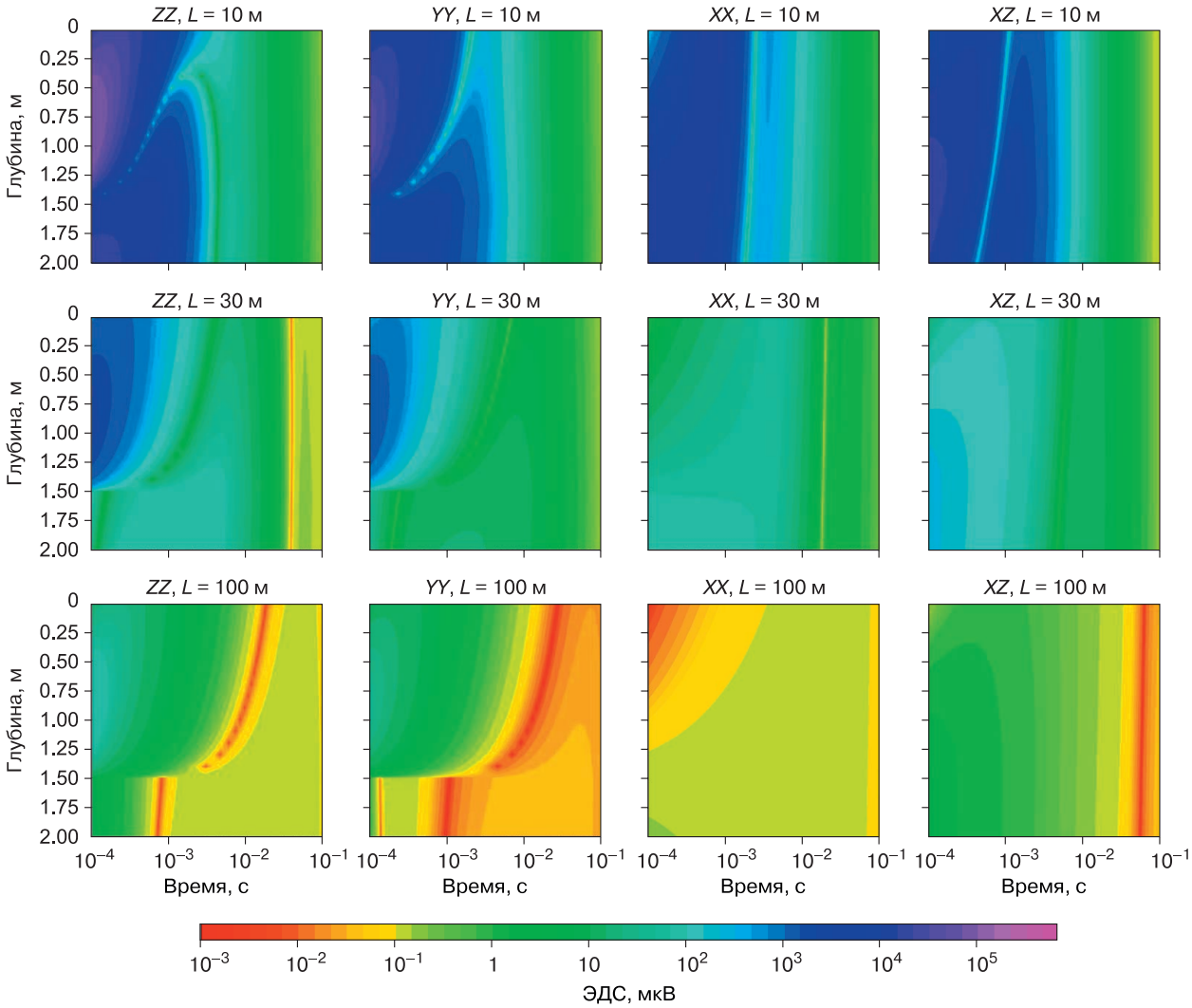

Рис. 3. Модули ЭДС для компонент поля *ZZ*, *YY*, *XX*, *XZ* в зависимости от глубины подошвы сезонно-мерзлых пород.

Глубина расположения источника и приемника 1.5 м.

ном, что позволит при интерпретации определить границу детально и достоверно.

Видно, что результат получается разным в зависимости от компонент поля (*ZZ*, *YY*, *XX*, *XZ*). Наибольшая чувствительность наблюдаемого сигнала к перемещению границы имеет место при использовании *ZZ*- и *YY*-компонент. С использованием компоненты *XX* сигнал слабо зависит от положения границы, а для компоненты *XZ* ее практически невозможно обнаружить. Таким образом, в первую очередь следует использовать компоненты поля *ZZ* и *YY*. Когда граница опускается ниже глубины зондирующей установки, для этих компонент сигналы в зависимости от времени качественно меняются, при этом чувствительность сигнала к дальнейшему увеличению глубины границы уменьшается.

Численное моделирование сигналов импульсного зондирования с использованием данных измерений температуры

При понижении температуры до отрицательных значений происходит замерзание воды в порах и трещинах, что приводит к скачкообразному возрастанию на 2–3 порядка удельного сопротивления пород. Поэтому УЭС мерзлых пород значительно больше сопротивления пород в талом состоянии (рис. 4).

Если в породе содержится только связанная вода, то УЭС породы при промерзании растет плавно, увеличиваясь всего в 2–3 раза (малая льдистость), а если вся поровая вода является прочносвязанной, то УЭС среды практически не меняется при переходе к отрицательной темпера-

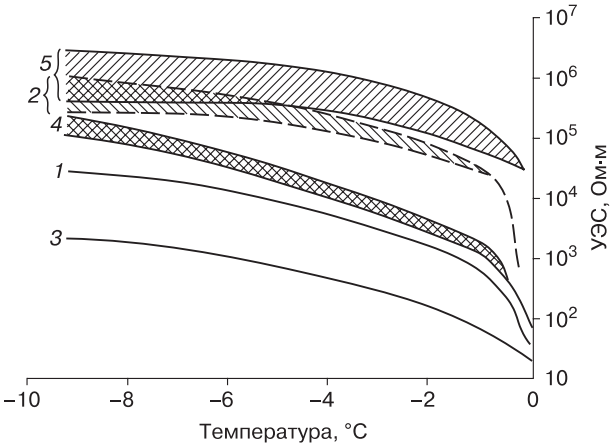

Рис. 4. Температурная зависимость УЭС мерзлых отложений:

1 – песок с массивной криогенной текстурой; *2* – то же, с шлировой текстурой; *3* – супеси и суглинки с массивной криогенной текстурой; *4* – то же, с шлировой текстурой; *5* – ледниковый лед [*Фролов, 1998*].

туре. Увеличение минерализации поровой воды понижает температуру замерзания породы и величину ее УЭС, влияет на тип криотекстуры, возникающей при промерзании, обусловливает особенности пространственного распределения льда и незамерзшей воды, а также состава включений примесного льда. При достаточно высоких концентрациях влияние порового раствора на значения УЭС может преобладать над влиянием гранулометрического и минерального состава породы.

Таким образом, УЭС мерзлых пород в зависимости от температуры, литологических особенностей, криотекстуры, влажности и степени минерализации порового раствора может находиться в пределах от нескольких единиц до 10^6 Ом·м. Относительная дифференциация породы по электропроводности после промерзания часто сохраняется, а среди кластических терригенных пород может возрасти [*Фролов, 1998*].

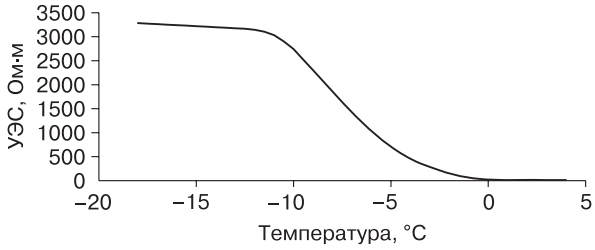

Рис. 5. Зависимость УЭС от температуры для супесей и суглинков с массивной криогенной текстурой.

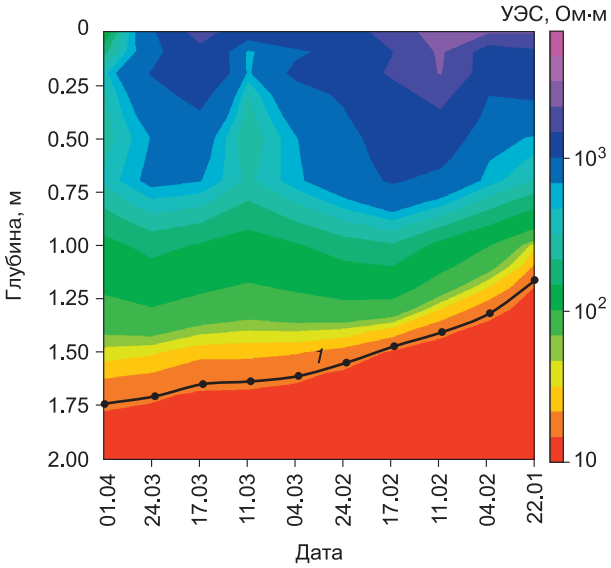

Рис. 6. Зависимость УЭС от глубины на разные даты измерения температуры на полигоне в 2022 г.

1 – граница нулевой температуры.

В нашем случае на полигоне в приповерхностном слое преобладают супеси и суглинки. Для моделирования УЭС в диапазоне температур от –18 до 4 °С за основу взят рис. 4 [*Фролов, 1998*]. На рис. 5 представлен интерполированный и экс-

Результаты измерений температуры пород, °С

Дата	Глубина, м									
	0	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0
22.01.2022	–13.31	–11.62	–7.94	–7.62	–6.12	–4.50	–3.62	–0.62	1.31	2.81
04.02.2022	–15.81	–9.38	–7.06	–7.00	–5.94	–4.88	–4.38	–1.50	0.81	2.44
11.02.2022	–17.31	–15.56	–12.12	–11.12	–9.06	–6.88	–5.50	–2.12	0.44	2.06
17.02.2022	–9.94	–9.94	–8.25	–8.62	–7.50	–6.56	–6.06	–3.00	0.12	1.75
24.02.2022	–6.69	–7.38	–6.31	–6.94	–6.12	–5.44	–5.25	–2.75	–0.19	1.44
04.03.2022	–7.19	–7.25	–5.69	–6.19	–5.31	–4.56	–4.44	–2.31	–0.38	1.19
11.03.2022	–6.88	–6.56	–4.38	–4.44	–3.69	–3.12	–3.56	–2.00	–0.44	1.06
17.03.2022	–9.44	–9.69	–7.62	–7.62	–6.38	–5.06	–4.62	–2.31	–0.44	0.94
24.03.2022	–5.56	–6.31	–5.19	–5.19	–5.38	–4.62	–4.81	–2.62	–0.62	0.81
01.04.2022	–0.69	–2.25	–2.75	–3.94	–3.56	–3.38	–3.81	–2.12	–0.69	0.69

траполированный график зависимости УЭС от температуры для супесей и суглинков.

Измерения температуры проводились в 2022 г. на месте расположения установки импульсного межскважинного электромагнитного зондирования. Температура породы регистрировалась перед каждым измерением на разных глубинах с помощью температурных датчиков. Данные измерений температуры представлены в таблице.

За все время измерений на глубине 2 м отрицательная температура не устанавливалась, несмотря на то что измерительная площадка регулярно очищалась от снега, при этом стоит отметить, что затяжных и сильных морозов в период с января по апрель 2022 г. не было.

На основе данных УЭС из рис. 5 и данных температуры из таблицы рассчитаны вариации сопротивлений супесей и суглинков на геофизическом полигоне за период с конца января по начало апреля (рис. 6). На рис. 6 представлена зависимость УЭС от глубины и даты измерения температуры на полигоне. Наблюдается увеличение со-

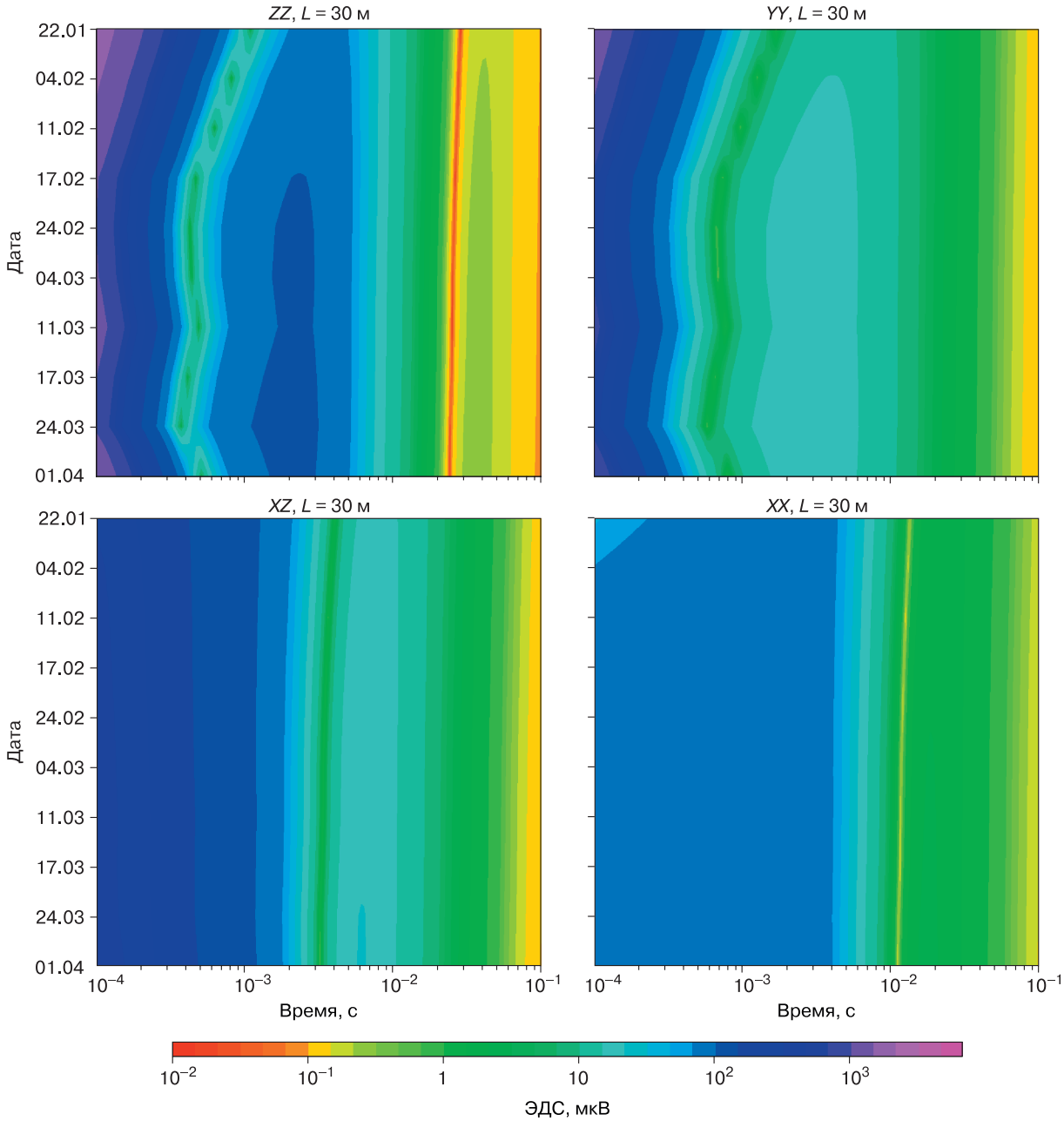

Рис. 7. Модули ЭДС для компонент поля *ZZ*, *YY*, *XZ*, *XX* в зависимости от даты измерения и времени регистрации.

противлений последовательно с каждым днем с глубины 1.25 м (январь) до 1.75 м (апрель) от 14 до 20 Ом·м. Здесь же проходит граница с температурой 0 °С и сопротивлением 19.6 Ом·м (линия *1* на рис. 6). Итак, видна динамика промерзания породы со временем. При этом ближе к поверхности до глубины 0.75 м с января по середину февраля наблюдается резкий рост УЭС до 3269 Ом·м, о чем говорят сильные заморозки в этот период. Но затем, с середины февраля по середину марта, отмечается спад значений сопротивлений до 1381 Ом·м. Далее возникает резкий скачок УЭС до 2495 Ом·м и к апрелю последовательный спад до 46 Ом·м. Таким образом, за последние полмесяца измерений температуры верхний слой почвы уже начал прогреваться, однако прогрев еще не достиг более глубокой части слоя мерзлых пород ниже 0.75 м.

На основе данных УЭС (см. рис. 6) смоделированы ЭДС для компонент поля *ZZ*, *YY*, *XZ*, *XX* в зависимости от даты измерения и времени регистрации (рис. 7). При построении задавалась горизонтально-слоистая модель с чередованием маломощных слоев (мощностью 0.1 м) с различным УЭС для каждого слоя в интервале глубин от 0 до 2 м. Расстояние между скважиной с источником и скважиной с приемником L = 30 м. Полученные результаты представляют собой мониторинг изменения ЭДС на геофизическом полигоне за период с конца января по начало апреля 2022 г., по которому можно при интерпретации определять границу между мерзлыми и нижележащими породами. Чувствительность к положению границы максимальна для *ZZ*- и *YY*-компонент поля, причем проявляется тенденция убывания значений ЭДС от января к апрелю в диапазоне времен $1\cdot10^{-4}$–$5\cdot10^{-2}$ с. Таким образом, наблюдается тренд уменьшения сигнала в области ранних и средних времен ($1\cdot10^{-4}$–$5\cdot10^{-2}$ с) на диаграммах ЭДС, который отражает динамику промерзания породы со временем (линия *1* на рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках исследования выполнено моделирование полевых экспериментов высокоразрешающего геофизического метода импульсного электромагнитного зондирования, в ходе которого развита теория обоснования полученных результатов.

По результатам моделирования сигналов импульсного электромагнитного зондирования установлена зависимость изменений сигналов ЭДС от расстояния между источником и приемником. Так, при расстоянии между источником и приемником L = 10 м наблюдается самый сильный уровень сигнала. Следует выбирать минимально возможное расстояние между источником и приемником при импульсных электромагнитных зондированиях мерзлых пород. Однако даже на расстоянии между ними L = 100 м можно проследить границу между сезонномерзлыми и нижележащими породами. Установлено, что наибольшая чувствительность наблюдаемого сигнала к перемещению границы имеет место при использовании *ZZ*- и *YY*-компонент поля, что указывает на значимость этих компонент при проведении полевых работ.

На основе измерений температуры на геофизическом полигоне в Новосибирской области и установленной зависимости между значениями УЭС и температурой рассчитаны вариации сопротивлений приповерхностных супесей и суглинков на глубине от 0 до 2 м за период с конца января по начало апреля 2022 г. Прослежена динамика изменения границы, соответствующей температуре 0 °С, между сезонномерзлыми и нижележащими породами. Так, с первого по последний день измерений породы монотонно промерзали с глубины 1.25 до 1.75 м.

С использованием рассчитанных по измеренной температуре сопротивлений выполнено численное моделирование амплитуды ЭДС для компонент поля *ZZ*, *YY*, *XX*, *XZ* в зависимости от даты измерения и времени регистрации ЭДС. Результаты представляют собой мониторинг изменения ЭДС на геофизическом полигоне за период с января по апрель 2022 г. Установлено, что компоненты поля *ZZ* и *YY* наиболее чувствительны к положению подошвы сезонномерзлых пород и характеризуют ее монотонное погружение.

Текущие импульсные электромагнитные зондирования выполнены применительно к сезонномерзлым породам. Однако сам метод нацелен на изучение мерзлых пород в целом. На следующем этапе исследования будут разработаны программно-алгоритмические средства обработки и интерпретации данных импульсного электромагнитного мониторинга, которые позволят с достаточной для практики точностью локализовать зоны как промерзания, так и оттаивания мерзлых пород.

Благодарности. *Авторы выражают благодарность сотрудникам Научно-исследовательского института измерительных приборов – Новосибирского завода имени Коминтерна (АО “НПО НИИИП-НЗиК”, г. Новосибирск) за организацию и проведение полевых экспериментов на геофизическом полигоне.*

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00181 “Импульсное электромагнитное зондирование многолетнемерзлых пород: теоретическое и экспериментальное развитие высокоразрешающего геофизического метода, научное обоснование и создание инновационной технологии мониторинга криолитозоны” (https://rscf.ru/project/22-17-00181/).

Литература

Ермаков А.П., Старовойтов А.В. Применение метода георадиолокации при инженерно-геологических исследованиях для оценки геокриологической обстановки // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология, 2010, № 6, с. 91–97.

Квон Д.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. и др. Применение электротомографии для идентификации в разрезе мерзлых и охлажденных пород разной степени засоленности // Криосфера Земли, 2019, т. XXIII, № 3, с. 3–12.

Копылов Д.В., Садуртдинов М.Р. Изучение талика под малым водотоком методом бесконтактной электроразведки // Криосфера Земли, 2020, т. XXIV, № 6, с. 45–54.

Мельников П.И., Раменский Р.М., Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны // Вестн. РАН, 1993, т. 63, № 12, с. 1090–1095.

Нерадовский Л.Г. Краткий очерк изучения влияния температуры мерзлых пород на электрическое сопротивление на постоянном токе // Геофизика, 2021, № 6, с. 15–24.

Никитенко М.Н., Глинских В.Н., Горносталев Д.И. Математическое обоснование импульсных электромагнитных зондирований для новых задач нефтепромысловой геофизики // Сиб. журн. вычислит. математики, 2021, т. 24, № 2, с. 179–192.

Никитенко М.Н., Глинских В.Н., Михайлов И.В. и др. Математическое моделирование сигналов импульсного электромагнитного зондирования для мониторинга состояния многолетнемерзлых пород // Геология и геофизика, 2023, т. 64, № 4, с. 591–600.

Никитин Д.С., Хуторской М.Д., Кириллин А.Р. и др. Температурный режим и прогноз геокриологической обстановки в губе Безымянной арх. Новая Земля (остров Южный) // Геофизика, 2022, № 2, с. 31–43.

Носкевич В.В., Кузьбожев А.С. Исследование оползневых покровных процессов на склоновых участках в зоне вечной мерзлоты в районе газопровода “Бованенково–Ухта” методом георадиолокации // Урал. геофиз. вестн., 2016, № 2, с. 54–60.

Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2008, 229 с.

Сергеев К.С., Белоусов А.В. Об отображении многолетнемерзлых пород в двумерных моделях геоэлектрики // Соврем. проблемы науки и образования, 2014, № 6, с. 1–8.

Судакова М.С., Садуртдинов М.Р., Малкова Г.В. и др. Применение георадиолокации при комплексных геокриологических исследованиях // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 3, с. 69–82.

Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Пущино, Изд-во ОНТИ ПНЦ РАН, 1998, 515 с.

Черепанов А.О. Комплекс радиоволновых исследований для решения геокриологических задач в районах развития ММП // Геофизика, 2018, № 1, с. 52–59.

Шестернев Д.М., Нерадовский Л.Г., Литовко А.В. Изучение методом индукции теплового состояния основания автодороги федерального значения “Амур” (Чита–Хабаровск) // Криосфера Земли, 2016, т. XX, № 2, с. 100–111.

Briggs M.A., Campbell S., Nolan J. et al. Surface geophysical methods for characterising frozen ground in transitional permafrost landscapes // Permafr. Periglac. Process., 2016, vol. 28, p. 52–65.

Glinskikh V., Nechaev O., Mikhaylov I. et al. Pulsed electromagnetic cross-well exploration for monitoring permafrost and examining the processes of its geocryological changes // Geosciences, 2021, vol. 11, No. 2, p. 1–15.

Hauck C. Frozen ground monitoring using DC resistivity tomography // Geophys. Res. Lett., 2002, vol. 29, p. 1–4.

Onaca A., Ardelean A.C., Urdea P. et al. Detection of mountain permafrost by combining conventional geophysical methods and thermal monitoring in the Retezat Mountains, Romania // Cold Reg. Sci. Technol., 2015, vol. 119, p. 111–123.

Vieira G., Bockheim J., Guglielmin M. et al. Thermal state of permafrost and active-layer monitoring in the Antarctic: advances during the international polar year 2007–2009 // Permafr. Periglac. Process., 2010, vol. 21, p. 182–197.

References

Ermakov A.P., Starovoitov A.V. Application of the GPR Method in Engineering Geological Surveys to Assess the Permafrost Condition. Vestnik Moskovskogo Universiteta [Moscow University Bulletin]. Ser. 4. Geology, 2010, No. 6, p. 91–97.

Kvon D.A., Modin I.N., Shevnin V.A. et al. Electrical resistivity tomography for identification of frozen and cold saline rocks. Earth’s Cryosphere, 2019, vol. XXIII, No. 3, p. 3–10.

Kopylov D.V., Sadurtdinov M.R. The study of talik under a small watercourse by the capacitive resistivity method. Earth’s Cryosphere, 2020, vol. XXIV, No. 6, p. 38–46.

Melnikov P.I., Ramensky R.M., Pavlov A.V. Permafrost monitoring. Vestn. Ross. Akad. Nauk, 1993, vol. 63, No. 12, p. 1090–1095.

Neradovsky L.G. A brief outline on study of frozen rocks temperature effect on electrical DC-resistance. Geofizika [Geophysics], 2021, No. 6, p. 15–24.

Nikitenko M.N., Glinskikh V.N., Gornostalev D.I. Mathematical substantiationof pulsed electromagnetic soundings for new problems of petroleum geophysics. Siber. J. Numer. Math., 2021, vol. 14, No. 2, p. 155–166.

Nikitenko M.N., Glinskikh V.N., Mikhaylov I.V. et al. Mathematical modeling of transient electromagnetic sounding signals for monitoring the state of permafrost. Russ. Geol. and Geophys., 2023, vol. 64, No. 4, p. 488–494.

Nikitin D.S., Khutorskoy M.D., Kirillin A.R. et al. Temperature regime and forecast of the geocryological situation in the Bezymyannaya Bay arch. Novaya Zemlya (South Island). Geofizika [Geophysics], 2022, No. 2, p. 31–43.

Noskevich V.V., Kuzbozhev A.S. Investigation GPR landslides cover processes on the slope areas permafrost near gas pipeline Bovanenkovo-Ukhta by the method of georadiolocation (GPR). Uralskij geofizicheskij vestnik [Ural Geophysical Bulletin], 2016, No. 2, p. 54–60.

Pavlov A.V. Monitoring kriolitozony [Permafrost monitoring]. Novosibirsk, Acad. Publ. House “Geo”, 2008, 229 p. (in Russian).

Sergeev K.S., Belousov A.V. On the permafrost representation in teo-dimensional geoelectric models. Sovremennue problemu nauki i obrazovaniya [Modern problems of science and education], 2014, No. 6, p. 1–8.

Sudakova M.S., Sadurtdinov M.R., Malkova G.V. et al. Ground penetrating radar applications to permafrost investigations. Earth’s Cryosphere, 2017, vol. XXI, No. 3, p. 62–74.

Frolov A.D. Elektricheskie i uprugie svoistva merzlykh porod i l’dov [Electrical and Elastic Properties of Frozen Rocks and Ice]. Pushchino, ONTI PNTs RAN, 1998, 515 p. (in Russian).

Cherepanov A.O. The radio wave research complex for solving geocryological problems in the permafrost areas. Geofizika [Geophysics], 2018, No. 1, p. 52–59.

Shesternev D.M., Neradovskiy L.G., Litovko A.V. Electromagnetic induction surveys for thermal monitoring of permafrost under the Amur federal road (Chita to Khabarovsk). Earth's Cryosphere, 2016, vol. XX, No. 2, p. 87–95.

Briggs M.A., Campbell S., Nolan J. et al. Surface geophysical methods for characterising frozen ground in transitional permafrost landscapes. Permafr. Periglac. Process., 2016, vol. 28, p. 52–65.

Glinskikh V., Nechaev O., Mikhaylov I. et al. Pulsed electromagnetic cross-well exploration for monitoring permafrost and examining the processes of its geocryological changes. Geosciences, 2021, vol. 11, No. 2, p. 1–15.

Hauck C. Frozen ground monitoring using DC resistivity tomography. Geophys. Res. Lett., 2002, vol. 29, p. 1–4.

Onaca A., Ardelean A.C., Urdea P. et al. Detection of mountain permafrost by combining conventional geophysical methods and thermal monitoring in the Retezat Mountains, Romania. Cold Reg. Sci. Technol., 2015, vol. 119, p. 111–123.

Vieira G., Bockheim J., Guglielmin M., Balks M. et al. Thermal state of permafrost and active-layer monitoring in the Antarctic: advances during the international polar year 2007–2009. Permafr. Periglac. Process., 2010, vol. 21, p. 182–197.

Поступила в редакцию 13 октября 2022 г.,
после доработки – 10 мая 2023 г.,
принята к публикации 26 июня 2023 г.